

特集号「地殻からマントルまで—モホ(面)とは何か?—」 はじめに

笠原 順三^{1),8)} 阿部 なつ江²⁾ 荒井 章司^{3),2)}
下司 信夫⁴⁾ 熊谷 英憲²⁾ 丸山 茂徳⁵⁾
小原 一成⁶⁾ 小原 泰彦⁷⁾

Preface for the Special Issue on “From the Crust to the Mantle: What is the Moho?”

Junzo KASAHARA^{1),8)}, Natue ABE²⁾, Shoji ARAI^{3),2)},
Nobuo GESHI⁴⁾, Hidenori KUMAGAI²⁾, Shigenori MARUYAMA⁵⁾,
Kazushige OBARA⁶⁾ and Yasuhiko OHARA⁷⁾

I. モホ(不連続)面

地球は地殻, マントル, 外殻, 内核で構成されているがその地殻とマントルの境界がモホ(不連続)面である。地殻を構成している物質, マントルを構成している物質も我々はよく知っているつもりであるが, モホの不連続性の程度や深さや性質, 海と陸のモホが同じかどうかなど, よくわかっていない。2006年9月に米国ポートランドで開催された国際ワークショップ IODP (Integrated Ocean Drilling Program) Mission Moho WS (Christie *et al.*, 2006) において, 比較的浅いと思われるモホまで掘削しよう(ミッションモ

ホ)という検討が行われたが, これを機にモホとは何か?を考えようとしたのが本特集号である。モホは「地震学的に定義されたものであるから, 物質を扱う岩石学的観察とは違う」という考えがあるが, 地震学的手法で得られたモホに関するデータも相当に多様であることがわかってきた。これら「モホ」に対し多様な解釈があることさえ理解されていない。また, 地震学で不連続面と考えられるモホも扱う地震波の波長や岩石学的スケールによって不連続ではなくある厚さを持ったモホ遷移層と考えられる。したがって, モホを「モホ面」, 「モホ不連続面」, 「モホ遷移層」と異なった言葉で表現することがあり得るが, それも

¹⁾ 日本大陸棚調査(株)

²⁾ 海洋研究開発機構地球内部変動研究センター

³⁾ 金沢大学自然科学研究科地球学教室

⁴⁾ 産業技術総合研究所地質調査総合研究センター

⁵⁾ 東京工業大学大学院理工学研究科

⁶⁾ 防災科学技術研究所地震研究部

⁷⁾ 海上保安庁海洋情報部

⁸⁾ 静岡大学理学部地球科学

¹⁾ Japan Continental Shelf Survey Co. Ltd.

²⁾ Institute for Research on Earth Evolution (IFREE), Independent Administrative Institution/Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

³⁾ Department of Earth Sciences, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

⁴⁾ Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

⁵⁾ Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

⁶⁾ Earthquake Research Department, National Research Institute for Earth Sciences and Disaster Prevention

⁷⁾ Japan Coast Guard

⁸⁾ Institute of Geosciences, University of Shizuoka

モホの実体が物質科学としてわかりつつある結果であろう。

ところで、クロアチアの地震学者アンドリヤ・モホロビッチ (Andrija Mohorovičić) は 1909 年 10 月 8 日クロアチアで起きた地震の走時曲線 (磯崎, 2008, 口絵 2 参照) において震央距離 175 km 付近に折れ曲がりを見出し、大陸地殻とマンツルの (不連続的) 境界が存在すると考えた (宇津, 1984; Kennett, 2001)。彼は深さ 50 km に地殻とマンツルの境界をなす (不連続的) 境界面があり、それより浅い部分の P 波速度 (V_p) は $V_p = 5.6 \text{ km/s}$, その境界面より下は $V_p = 7.8 \text{ km/s}$ を得た。これが今日のモホ不連続面 (Moho discontinuity) と呼ばれる地殻とマンツルの (不連続的) 地震波速度境界である。

本特集号では、地震学的なモホとマンツルウエッジの理解、海洋地殻・遷移的モホの物質の岩石学的考察、かんらん岩の変質などを扱い、これらに関する地震学・岩石学の相互の理解に貢献できることを期待する。

II. 地震学的にみたモホとマンツル

笠原ほか (2008) はマルチチャンネル反射法 (MCS) データにみられるモホ反射の特徴をまとめ、モホからの反射が 200 km にわたり連続的に見える場所があったり、モホの反射が不連続的になくなったりする現象を指摘した。海山や海嶺の下ではモホを確認できない。また、極めて高精度の地震波反射法でもモホが見えない場所が多い。それらの現象を理論波形を用いて検討を行った結果、MCS においてモホが明瞭に見える場合でも厚さが 100 m 程度ある可能性があることがわかってきた。これらの観察はオマーンオフィオライトの岩石学的観察と調和的である。またマンツルかんらん岩中のオリビンの選択方位が見かけのモホ反射強度の大小を作っている可能性も示唆した。道林 (2008) はかんらん岩の微細構造と結晶方位異方性と弾性波速度の異方性の関係について示した。マンツルにおけるかんらん岩の構造の向きによって、地震波異方性に対する影響が変化することを示し、その一例として一の目濁火山か

んらん岩ノジュールの解析結果を示した。笠原ほか (2008) が検討したように、かんらん岩中のオリビンの向きが地震学的にみたモホの見え方に大きく関係するだろう。汐見ほか (2008) は自然地震を使って、モホで P 波から S 波へ変化する地震波を用いたレシーバー関数と呼ばれる手法によって紀伊半島の下のモホの形状と深さを求めた。得られたモホは人工地震によるモホの深さとおおむね一致するが、紀伊半島の中中部では P-S 変換によってはモホをイメージできず、そのモホは蛇紋石化し、遷移的であるとした。ここで用いられる蛇紋石化による遷移的モホとガブロ・ダナイトからなる遷移層とは同じではないことは注意を要する。

沈み込み境界では島弧のモホと沈み込む海洋プレートのモホが存在する。長谷川ほか (2008) は東北日本沈み込み帯を対象として、この地域で得られた高解像度の地震学的構造と岩石学的考察による H_2O 輸送-溶融モデルとを詳細に比較検討することにより、沈み込むスラブから吐き出され最終的に島弧地殻にまで達する H_2O の輸送経路を推定した。沈み込み境界の地震が緑泥石と蛇紋石の脱水反応と一致し、それからマンツルウエッジに放出される水とトモグラフィの結果を検討し、両者が良い一致を示すことを明らかにした。マンツルウエッジ中の沈み込み境界に平行に上昇する水があるだろう。中島・長谷川 (2008) は東北日本の沈み込み境界に平行なマンツルウエッジ中の低速度・高減衰域を数値計算と異方性から評価し、そこでの温度が含水かんらん岩メルトに達し、1-4% のメルトができてそれが上昇流となっていることを示唆した。彼らが示した S 波の異方性はホモ面の性質と密接に関係している。

III. 岩石学的にみた海洋地殻・マンツルの境界としてのモホ

最上部マンツルとその部分溶融物である海洋地殻との境界であるモホは、物質科学的にはマンツル内におけるマグマの発生場と、地殻内における冷却・固結する場との境界としてとらえることが可能である。海洋地殻の大部分はいわゆる中央海

嶺システムで形成され、マンツルの部分溶融のさまざまな不均質性を反映した多様な MORB マグマが生産され、上昇したマグマはモホを通過して地殻内部に貫入あるいは海底面に噴出して新たな海洋地殻を形成する。

佐藤ほか (2008) は MORB の主要元素、微量元素と同位体に関する最近のデータベースを用い、MORB の多様性とその地域性を示し、これらの多様性は枯渇したマンツルと K_2O や TiO_2 に富む物質との混合からできたと考えた。佐藤ほか (2008) はこれらのコンパイルデータから、地球化学的にみて少なくとも大西洋赤道域・太平洋と南部大西洋・インド洋型の 2 種類のマンツル域があることを提唱し、その成因はブルームや沈み込み、大陸地殻、古い沈み込みから放出された流体などの寄与の程度の多様性にあると考えた。

近年の調査により、海洋地殻の形成は従来考えられていたような中央海嶺軸における線状の狭い領域に限られているわけではなく、高速拡大軸では海嶺軸から離れた地域でも活発な火成活動により海洋地殻が生産されていることが明らかになりつつある。海野ほか (2008) は東太平洋海膨から 200 km 以上離れた場所に溶岩原、単成火山、線状火山列として存在する火山列が、いわゆるオフリッジ火山活動によって形成されたものであることを示し、そのオフリッジ火山活動がモホ遷移帯と密接な関係があることを示唆した。そこで採取される岩石は EMORB, NMORB, TMORB と多様であり遷移的マンツルとのミキシングを示唆する。一方で小澤 (2008) では、オフィオライトや海底掘削で普遍的に採取されるダナイトに着目し、その成因に関する最近の研究をまとめている。ダナイトの形成を理解するには、温度や圧力条件、メルト組成と源物質であるマンツルかんらん岩の組成との関係 (メルト-マンツル相互作用) など、さまざまな要因に制約されるが、そのダナイトの形成程度により、モホ面深度 (つまり地殻厚) が左右されることを明確に指摘している。このように、オフリッジ火山活動やモホ遷移帯におけるダナイト形成の観察・研究と、近年東太平洋中央海膨での海底地震計を用いた地震学観測結

果によるモホ直下のメルトレンズの存在 (Dunn *et al.*, 2000 など) との整合性を検証する作業は、今後ますます重要になるであろう。

海洋地殻の大部分を占める下部地殻 (地殻中部～モホ遷移帯まで含む) の形成過程を解明することは、中央海嶺におけるマグマ形成および海洋プレート形成・拡大過程を理解する上で、もっとも重要な要素の一つであろう。宮下ほか (2008) では、太平洋における掘削結果を中心に、高速拡大海嶺付近のオフセット拡大 (Pito Deep など) や、オフィオライトの研究を交えつつ、下部地殻を構成する岩石や、その形成に関する最新の研究をまとめている。一方、荒井・阿部 (2008) では、まず「モホ面」という言葉の定義を再確認している。海洋のみならず、オフィオライトや捕獲岩の岩石学的研究から、モホ遷移帯に関するものをまとめ、推定される「モホ」のイメージを、海洋のみならず、日本列島などの島弧性モホについても検証している。

さらに、海洋プレートのどの深さまで水が循環し、変質が進行するのを見極めることは、地震波がとらえた地下構造を解釈する上で、極めて重要な要素である。野坂 (2008) では、海洋地殻、特に下部地殻における海洋底変成作用 (加水作用) について、掘削結果を中心に、近年明らかになった変成岩岩石学的研究成果を中心にまとめている。ここでは、海洋下部地殻が玄武岩質深成岩 (はんれい岩) であり、海洋プレートがオフィオライト層序を保つとするいわゆる「ペンローズ・モデル」とは対照的な「ヘス・モデル」(下部地殻は 30% 以上蛇紋岩化したかんらん岩であるとするもの) を、変成岩岩石学的に検証している。一方森下ほか (2008) では、同じ変質作用を海水と海洋底を構成する岩石との元素の交換を中心にとらえ、地球化学的研究成果としてまとめている。熱水循環による元素の移動は、地球の初期生命誕生の謎を解く鍵としても重要な要素であり、モホの実体を探る上で新しい側面からのアプローチとして注目される。

海洋プレートを構成する物質の岩石学的・地球化学的研究は、ここ 10 年の間に爆発的に数を増

し、我々の知識は飛躍的に進歩した。一方で、「モホ面」を形成する物質については、未解決のままであり、問題は狭められてはいるものの、核心をつく回答は得られていない。結局のところ、この問題を解決するには、掘削して直接モホの物質を手に入れる以外に方法はない、というのが本特集号における大多数の意見である。

IV. おわりに

陸上と海底にはかつてモホ面であったと思われる露頭がいくつかあるが、モホとは何であるかを確実に言うことは難しい。本特集では海域と島弧のモホと沈み込み帯のマントルウエッジ、海洋地殻の岩石とその変質（変成作用）、オフリッジマグマ活動と遷移的マントル、蛇紋岩化、等が議論された。本特集号で扱われたモホとマントルに関する議論はごく限られたものであるために、モホの全体的イメージを描けたとはとても言えないが、少なくともモホに関して我々が十分な知識があるとは言えないだろう。これを機に今後ともモホとは何かを考えるきっかけになることを期待する。また岩石学者と地震学者の相互理解が重要であることを改めて痛感した。

文 献

荒井章司・阿部なつ江 (2008): モホの岩石学的実体を探る—21世紀モホールを目指して—. 地学雑誌, **117**, 110-123.
Christie, D., Ildefonse, B., Abe, N., Arai, S., Blackman, D., Duncan, R., Hooft, E., Humphris, S., Miller, J. and Mission Moho WS participants (2006): Mission Moho—Formation and Evolution of Oceanic Lithosphere—workshop report.
<http://www.iodp.org/mission-moho-workshop/> [Cit-

ed 2007/12/07].
Dunn, R.A., Toomey, D.R. and Solomon, S.C. (2000): Three-dimensional seismic structure and physical properties of the crust and shallow mantle beneath the East Pacific Rise at 9°30'N. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 23537-23555.
長谷川 昭・中島淳一・北 佐枝子・辻 優介・新居恭平・岡田知己・松澤 暢・趙 大鵬 (2008): 地震波でみた東北日本沈み込み帯の水の循環—スラブから島弧地殻への水の供給—. 地学雑誌, **117**, 59-75.
磯崎行雄 (2008): モホロピッチ地震計. 地学雑誌, **117**, 268-269, i-ii.
笠原順三・宇納貞男・鶴我佳代子・池 俊宏・神田慶太 (2008): 西太平洋のマルチチャンネル地震波反射記録断面に見られるモホ反射面の特徴とモホ遷移層の性質. 地学雑誌, **117**, 5-44.
Kennett, B.L.N. (2001): *The Seismic Wavefield, Volume 1: Introduction and Theoretical Development*. Cambridge University Press, 370p.
道林克禎 (2008): かんらん岩の構造敏感性と弾性的異方性. 地学雑誌, **117**, 93-109.
宮下純夫・足立佳子・海野 進 (2008): 海洋地殻の構造と形成プロセス. 地学雑誌, **117**, 168-189.
森下知晃・中村謙太郎・澤口 隆・原 香織・荒井章司・熊谷英憲 (2008): 海洋リソスフェアの熱水変質に伴う元素移動. 地学雑誌, **117**, 220-252.
中島淳一・長谷川 昭 (2008): 東北日本弧下のマントルウエッジの地震学的構造とその解釈. 地学雑誌, **117**, 76-92.
野坂俊夫 (2008): 海洋下部地殻および上部マントルの変質作用と変質鉱物. 地学雑誌, **117**, 253-267.
小澤一仁 (2008): 海洋モホ面形成におけるダナイトの役割. 地学雑誌, **117**, 146-167.
佐藤 暢・熊谷英憲・根尾夏紀・中村謙太郎 (2008): 中央海嶺玄武岩の化学組成の多様性とその成因. 地学雑誌, **117**, 124-145.
汐見勝彦・松原 誠・小原一成 (2008): 地震学的探査によるモホ不連続面の検出—近畿地方を例として—. 地学雑誌, **117**, 45-58.
海野 進・下司信夫・熊谷英憲・岸本清行 (2008): 東太平洋海膨のオフリッジ火山活動はモホ遷移帯起源か?. 地学雑誌, **117**, 190-219.
宇津徳治 (1984): 地震学 第2版. 共立出版, 310p.